

**CONCEPTION GÉOMÉTRIQUE DE MINES À CIEL OUVERT
AVEC PISTES ET ANALYSE DE LA STABILITÉ DES TALUS
PAR LE LOGICIEL DEGRÉS
GEOMETRICAL DESIGN OF OPEN CAST MINES WITH TRACKS
AND SLOPE STABILITY ANALYSES BY USING THE DEGRES SOFTWARE**

FLEURISSON J.A., ALOSON-GARCIA J. COJEAN R.

Centre de Géologie de l'Ingénieur, Ecole des Mines de Paris, France

TANAYS E.

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Nancy, France

HANTZ D., PAQUETTE Y.

INERIS, France

DRIANCOURT D.

HBCM-UE Tarn, France

Résumé :

Le logiciel DEGRES est un outil informatique d'aide à la décision pour la conception géométrique et pour l'analyse de la stabilité de mines ou carrières à ciel ouvert de type fosse avec ou sans piste. Il permet de générer automatiquement un modèle géométrique à partir d'un contour de crête ou de fond de fosse et d'y insérer automatiquement une piste. En couplant ce modèle géométrique avec un modèle géologique et géotechnique du gisement, on peut analyser la stabilité de tout ou partie de chaque flanc de fosse selon des mécanismes de rupture déterminés et ainsi produire les volumes et les coefficients de sécurité des masses rocheuses instables.

Abstract :

The DEGRES software is a computational tool to help the decision in the field of geometrical design and geotechnical studies in open-cast mines and quarries with or without tracks. It automatically provides a geometrical model from a basis contour which represents the crest or the foot line of the pit. A track can be automatically inserted in this model. This geometrical model is then associated with a geological and geotechnical model of the ore body. Various basic failure mechanisms are then analyzed for the total or partial height of each pit side and the software provides volumes and safety factors of unstable rock masses.

INTRODUCTION

Le logiciel DEGRES - Détection Généralisée des Ruptures et Evaluation de la Stabilité - a été développé par le Centre de Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole des Mines de Paris en collaboration avec l'INERIS et les HBCM-UE Tarn dans le cadre du projet de la Grande Découverte de Carmaux.

Conçu dans le but d'une meilleure intégration des études géotechniques dans la planification minière, ce logiciel constitue un outil informatique interactif qui permet de concevoir automatiquement un modèle géométrique de fosse, et, grâce à un interfaçage avec des

modèles géologiques et géotechniques, d'analyser pour chaque flanc de fosse les risques d'instabilité suivant des mécanismes de rupture déterminés.

Installée depuis 1988 à Carmaux, puis dans toutes les découvertes des HBCM, la première version a déjà fait l'objet de publications ([1],[2]) et nous n'en présenterons ici que le principe. Dans le but de répondre davantage aux préoccupations des exploitants et de rendre le modèle géométrique plus réaliste, une seconde version permet d'insérer dans le modèle géométrique ainsi établi une piste définie par une largeur, une pente et un point de départ situé sur le contour de crête. Nous exposerons le principe utilisé pour l'insertion d'une piste et les conséquences que cela entraîne au niveau de l'évaluation de la stabilité.

1. Principes du logiciel DEGRES

Le logiciel DEGRES a pour objectif de faciliter la décision de l'expert et de l'exploitant en matière de planification minière dans le domaine de la géotechnique. Il constitue un outil intégré et interactif, élaboré à l'aide du système GEOL ([3]) dans une structure algorithmique, et utilise des données stockées suivant la structure de fichiers GEOL-Data-Table (GDT). Il est écrit en Fortran 77.

1.1. Données d'entrée

Les données utilisées par le logiciel sont de deux natures: des informations géologiques et géotechniques et des informations géométriques.

1.1.1. Informations de nature géologique et géotechnique

Suivant la quantité d'informations disponibles sur le site analysé, trois modèles, stockés dans différents fichiers de type GDT, sont possibles:

- le modèle des couches de minéral: les couches sont modélisées suivant une grille régulière dont les noeuds sont informés par les cotes de leur toit et de leur mur.
- le modèle des failles principales: il résulte de la numérisation sur des coupes successives des accidents tectoniques majeurs sous la forme de suite de points.
- le modèle de petites fractures: il regroupe l'ensemble des discontinuités autres que les failles sous forme de familles représentées par un individu moyen. Ces familles sont déterminées par ailleurs à partir du traitement de mesures effectuées sur le site. Le modèle regroupe pour chaque famille les paramètres orientation, pendage et direction de pendage (ou azimut et pendage) cohésion et angle de frottement. Il est à noter que si l'on ne dispose pas d'un modèle de failles tel qu'il a été décrit ci-dessus, chaque faille principale peut être considérée comme une famille de petites fracturations et incluse dans ce modèle.

1.1.2. Informations de nature géométrique

Il s'agit des données nécessaires à la réalisation du modèle géométrique:

- le contour de base: il est défini par sa nature (crête ou fond de fosse), sa cote (il est obligatoirement horizontal), et les abscisses et ordonnées des points qui le constituent.
- les secteurs géométriques homogènes: il s'agit de définir les zones de l'espace pour lesquelles les flancs de la fosse présentent une configuration géométrique constante. Chaque secteur est défini par le point du contour de base qui le débute, la pente globale du flanc (pente moyenne ou pente enveloppe) et, si des gradins existent, leurs caractéristiques géométriques (pente et hauteur des talus, pente et largeur des banquettes), sinon l'équidistance des courbes de niveau.
- la limitation verticale de la fosse c'est-à-dire la hauteur maximale à générer.

1.2. Génération automatique du modèle de fosse

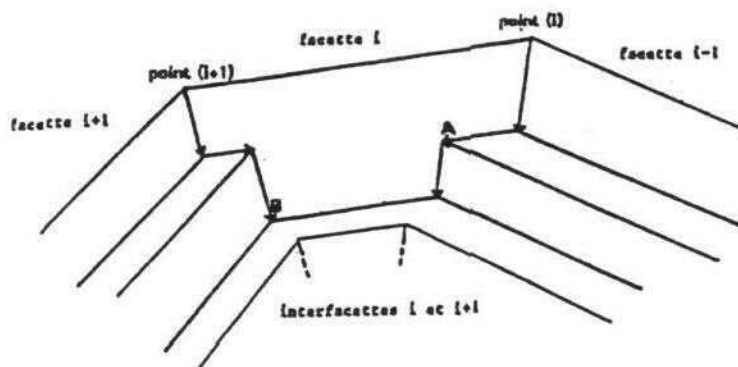


figure 1 : relations géométriques entre les interfacettes et leur facette.

Chaque segment du contour de base définit une facette. L'intersection de deux facettes contiguës est appelée interfacette. A partir de chaque point du contour de base est calculée une interfacette par une suite de translations déterminées à partir de la nature et des paramètres géométriques des deux facettes qu'elle sépare (figure 1). Dans certaines configurations, deux interfacettes peuvent s'intersecter ce qui correspond à une disparition de facette. A partir du point d'intersection, une nouvelle interfacette est alors recalculée en considérant les deux facettes qui entouraient celle qui a disparu.

L'ensemble des points des interfacettes est stocké sous forme d'une suite de contours à partir du contour de base (figure 2).

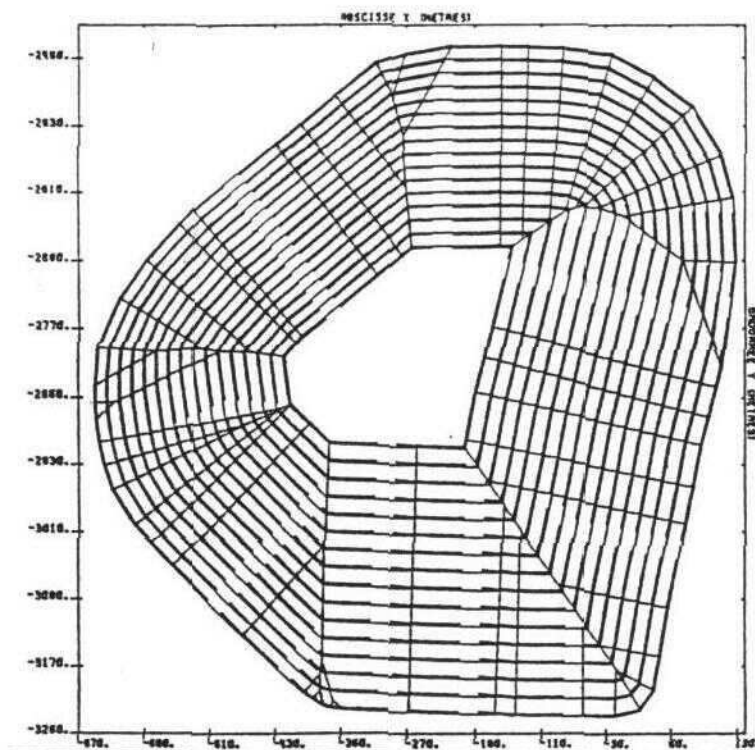


figure 2 : plan de la géométrie finale de la fosse Sainte-Marie de Carmaux dans les terrains houillers.

1.3. Détection des risques de rupture et évaluation de la stabilité

La détection des risques de rupture consiste à identifier, parmi un ensemble de mécanismes de rupture élémentaires déterminés (figure 3), ceux qui sont cinématiquement possibles en fonction des caractéristiques géométriques de la fosse et des discontinuités modélisées dans le cadre du logiciel. Cette analyse peut être menée à l'échelle du gradin, d'un ensemble de gradin ou du flanc entier.

Ces mécanismes de rupture sont bien connus en mécanique des roches et leur réalisme a été prouvé par de nombreux auteurs. Cependant, à l'échelle d'un flanc de fosse (100 m et plus), les mécanismes de rupture sont souvent complexes et ne peuvent être décrits de façon simple. L'analyse de la stabilité à cette échelle doit donc être menée par ailleurs à l'aide des mécanismes de rupture mieux appropriés.

1.3.1. Principe des règles de détection

À chaque mécanisme de rupture envisagé peut être associé un stéréogramme qui traduit les relations angulaires qui doivent exister entre les discontinuités et avec le talus pour que la rupture soit cinématiquement possible ([4]). Ces relations angulaires ont été écrites de manière analytique. Pour chaque mécanisme, des règles de détection ont été établies sous la forme d'un ensemble de faits élémentaires vrais ou faux concernant la comparaison des angles des objets composant le flanc de fosse (plan moyen, plan de talus de gradin, plan de banquette) et des discontinuités (failles et familles de petites fractures).

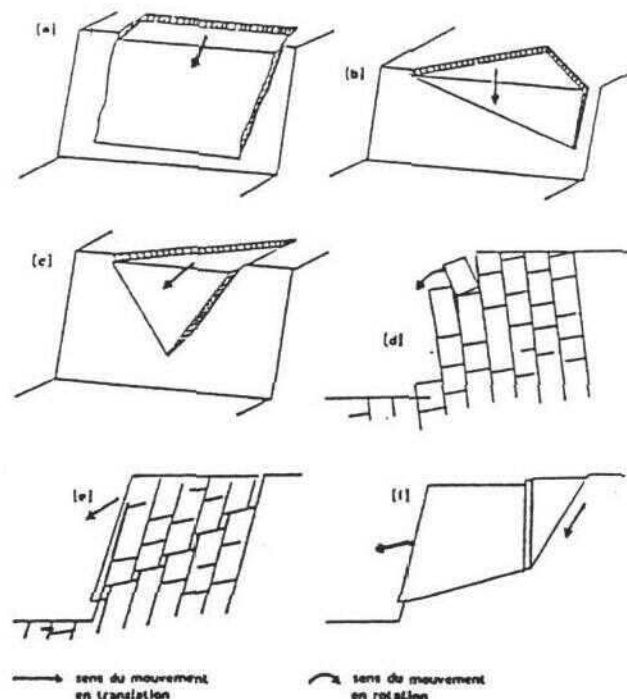


figure 3 : mécanismes de rupture analysés par le logiciel DEGRES: [a] rupture plane simple; [b] rupture en dièdre, glissement sur un seul plan; [c] rupture en dièdre, glissement sur deux plans; [d] rupture par basculement de blocs, [e] rupture par glissement sur un escalier; [f] rupture bilinéaire.

1.3.2. Sectorisation du modèle de fosse

La sectorisation permet de découper le modèle de fosse généré automatiquement en secteurs présentant des caractéristiques (direction et pendage) constantes et donc utilisables par les règles de détection. Ces secteurs correspondent aux facettes définies précédemment limitées par deux interfacettes et les segments correspondants sur les contours de crête et/ou de fond de fosse et/ou un point d'arrêt si la facette disparaît. Dans chaque secteur, on évalue sa direction et les pendages des différents objets soumis aux règles de détection: plan moyen du flanc du secteur, plans de talus et de banquettes des gradins s'ils existent.

1.3.3. Résultats de la détection des risques de rupture

Pour chaque objet géométrique (gradin, ensemble de gradins, flanc de fosse) de chaque secteur de fosse et pour chacun des couples de discontinuités possibles, les règles sont systématiquement appliquées. Les résultats positifs sont stockés sous forme de triplet comprenant le type de la rupture, les numéros de la ou des deux discontinuités concernées. Cette opération est répétée pour les trois types d'associations de discontinuités possibles: faille-faille, faille-famille de petites fractures, familles de petites fractures entre elles deux à deux.

Les résultats peuvent être édités, soit sous une forme numérique qui donne, pour chaque secteur et pour chaque objet analysé, les ruptures détectées et les couples de discontinuités mis en jeu, soit sous une forme graphique qui fournit un plan de la fosse sectorisée avec, dans chaque secteur, des figurés représentant chaque type de rupture détecté (figure 4).

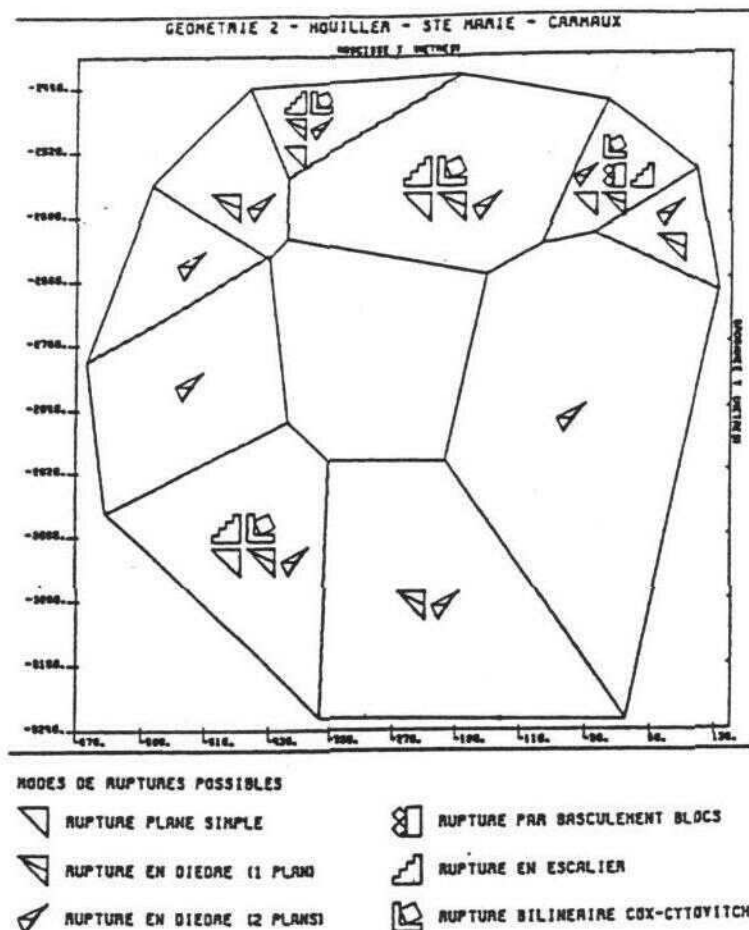


figure 4 : résultats de la détection des risque de ruptures concernant les gradins

1.3.4. Evaluation de la stabilité

Cette partie du logiciel permet de calculer les coefficients de sécurité des ruptures cinématiquement possibles identifiées à la phase précédente. Elle fournit également, pour chaque type de rupture, le volume instable ayant le coefficient de sécurité le plus faible et le coefficient de sécurité associé au volume instable le plus grand. Dans un premier temps, on réalise la modélisation géométrique des ruptures en tenant compte du fait que les surfaces de rupture sont constituées d'éléments parfaitement définis dans l'espace (failles ou joints stratigraphiques) et/ou de petites fractures non positionnées. Dans un second temps, on calcule les coefficients de sécurité par des méthodes classiques de calcul à l'équilibre limite.

2. Insertion semi-automatique des pistes dans le modèle de fosse

Les pistes sont des éléments qui font partie intégrante de la conception géométrique des mines à ciel ouvert puisqu'elles assurent la fonction essentielle du transport et sont présentes tout au long de la vie de l'exploitation. Il peut s'agir aussi bien de pistes de roulage de camions ou de descentes de convoyeurs à bande.

La prise en compte de piste dans un modèle de fosse a des conséquences sur la géométrie (modification de la pente, contraction du fond de fosse ou dilatation de la crête) et sur la stabilité (modification de la pente, modification relative de la position des objets géologiques par rapport à la surface topographique).

Ces constatations nous ont conduits à développer une nouvelle version du logiciel DEGRES qui permet l'insertion d'une piste dans un modèle de fosse déjà généré de manière automatique. Une implantation de piste totalement automatique nous a semblé mal adaptée car la détermination des points de départ, d'arrivée et de passage obligé d'une piste dépend d'un nombre important de variables qui, de plus, échappent à toute systématisation. Pour ces raisons, nous avons choisi une approche semi-automatique qui permet d'aboutir au résultat voulu par approximations successives: l'utilisateur propose une géométrie et, en fonction du résultat, il la modifie progressivement.

Le problème consiste donc à insérer une piste dans un modèle géométrique de fosse préalablement généré par le logiciel, compte tenu d'un point de départ, d'une pente et d'une largeur de piste.

2.1. Hypothèses de travail

Dans le cadre de cette version, nous nous sommes limités à l'insertion d'une seule piste. Sa construction repose sur les hypothèses suivantes:

- Construction dite "en remblai": l'option choisie consiste à insérer la piste en donnant aux deux facettes, situées au-dessus et en-dessous de la piste, la pente moyenne de la facette originelle du modèle de fosse sans piste, et en modifiant l'emprise du fond de fosse par contraction. Le bord extérieur de la piste (côté massif) s'appuie sur le plan enveloppe des pieds de gradins de la facette considérée; le bord intérieur (côté fosse) est obtenu par translation selon le vecteur largeur de piste. La partie de la facette côté bord intérieur est modifiée en considérant que la droite constituant le bord intérieur doit être située dans le plan enveloppe des sommets de gradins de la future portion de facette.

- Construction par tronçons: dans le but de pouvoir modifier les paramètres de la piste, largeur et/ou pente, une option permet de construire des tronçons de piste et de les coller pour obtenir des séries continues ou discontinues. Celles-ci doivent cependant respecter les contraintes suivantes: absence de zigzags (le sens de parcours doit être le même); dans le cas d'une prolongation, le nouveau tronçon doit démarrer à un point situé sur le même flanc et à la même cote que l'extrémité du tronçon précédent; le premier tronçon d'une piste doit toujours démarrer du contour de crête.

- construction des virages: lors de la conception d'une piste dans une mine à ciel ouvert, les virages constituent des problèmes complexes qui sont en général analysés cas par cas. Nous avons donc simplifié le problème en considérant que les virages s'effectuaient à plat sans tenir compte du rayon de courbure minimal, ni du devers.

2.2. Données d'entrée

Chaque tronçon de piste est défini par un point de départ, un sens de rotation, une pente et une largeur, et une longueur. Ces paramètres sont saisis de manière interactive.

La géométrie de la fosse dans laquelle on veut insérer un ou plusieurs tronçons de piste doit avoir été générée au préalable. Elle est stockée dans un fichier de type GDT. Ce modèle doit être concave et ne doit pas contenir de disparition de facette.

2.3. Principe de l'insertion d'une piste

Il s'agit successivement de construire la géométrie de la piste et de l'insérer dans l'objet fosse.

2.3.1. Détermination des points de passage oblique

Ce sont les points extrémités des segments de droite constituant les bords extérieur et intérieur de la piste sur chaque facette.

La première étape consiste à reconnaître la géométrie initiale de la fosse (sans piste ou avec un tronçon de piste à prolonger) en déterminant, pour chaque facette, les équations cartésiennes des plans enveloppes contenant les pieds de gradins. La connaissance du point de départ permet de définir la facette de départ.

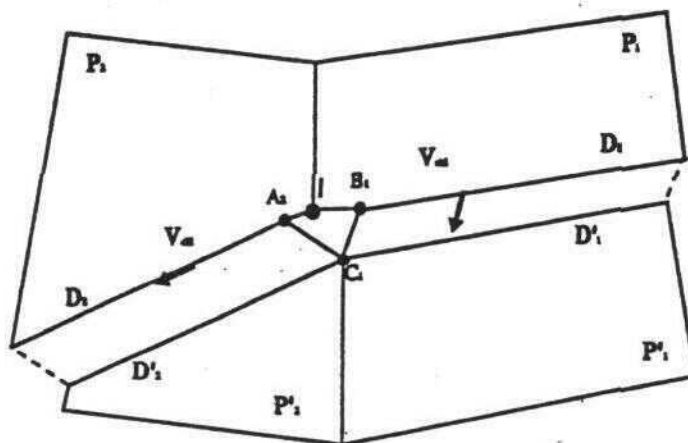


figure 5 : construction des points de passage de la piste au niveau des virages.

Le premier point du bord extérieur de la piste est obtenu par projection horizontale du point de départ sur le flanc concerné. Son homologue sur le bord intérieur est obtenu par translation d'une largeur de piste perpendiculairement à l'axe de la piste.

Sur la même facette, on détermine les deux autres extrémités des bords de piste correspondant au passage à la facette suivante (figure 5) : on intersecte le bord intérieur de la piste avec un plan parallèle au plan enveloppe des pieds de gradins de la facette suivante et décalé d'une largeur de banquette; le point C1 obtenu représente à la fois, l'extrémité finale du bord intérieur de la piste pour la première facette, et le point de départ du bord intérieur de la piste pour la

facette suivante. Par projection de ce point sur le plan enveloppe des pieds de gradins de chaque flanc, on obtient respectivement, l'extrémité finale B_1 du bord extérieur de la piste sur la première facette et le point de départ A_2 du bord extérieur de la piste sur la facette suivante. Un autre point I est également calculé: c'est l'intersection des deux plans enveloppe des pieds de gradins et du plan horizontal contenant le point d'intersection des deux bords intérieurs. Il constitue le quatrième point du palier horizontal représentant le virage et appartient à l'interfacette. Cette dernière opération est répétée pour chaque passage entre facettes jusqu'à atteindre la longueur de piste prévue. Si plusieurs tours sont nécessaires, le modèle de fosse contenant le premier tour jouera le rôle de géométrie initiale et tout le cycle est à reprendre.

2.3.2. Intersection de la piste avec les lignes de pieds de gradin

Le bord extérieur de la piste étant déterminé pour chaque facette, on complète la connaissance de la piste en faisant son intersection avec les lignes de pieds de gradins de la facette (segments liants deux points consécutifs de nature pied de gradin dans le GDT initial).

Par translation de ces nouveaux points d'une largeur de piste, on obtient leurs homologues sur le bord intérieur.

2.3.3. Modification des interfacettes situées sous la piste

L'insertion d'une piste dans une facette conduit à décaler la portion de la facette située sous la piste d'une largeur de piste. Il est donc nécessaire de reconstruire les intersections de cette nouvelle facette avec les facettes voisines. Ces nouvelles interfacettes sont calculées suivant le même principe que celui utilisé lors la génération automatique de fosse sans piste. Les disparitions de facette que peut provoquer la présence d'une piste sont également testées; s'il en existe, la construction du modèle est stoppé conformément aux hypothèses adoptées.

2.3.4. Insertion des nouveaux points dans le GDT

Les points constituant les bords intérieur et extérieur de la piste, les virages et les nouvelles interfacettes sont insérés, contour par contour, dans le GDT du modèle de fosse initial (figure 6).

2.4. Sectorisation et analyse de la stabilité

Comme dans le cas d'une fosse sans piste, on réalise tout d'abord une sectorisation de la fosse. Les secteurs obtenus sont des triangles ou des quadrilatères limités, en haut par la crête de fosse ou un bord intérieur de piste, en bas par le fond de fosse ou un bord extérieur de piste, et sur les côtés par deux interfacettes. A la différence des modèles de fosse sans piste, les contours supérieur et inférieur des secteurs ne coïncident pas, en général, avec le contour de crête ou de fond de fosse; de plus, leur surface se gauchit aux abords de la piste en raison des zones d'influence dues au passage de la piste. Les triangles correspondant à ces zones ont donc été exclus du secteur, pour permettre d'utiliser les mêmes modules d'analyse de la stabilité que dans le cas des fosses sans piste.

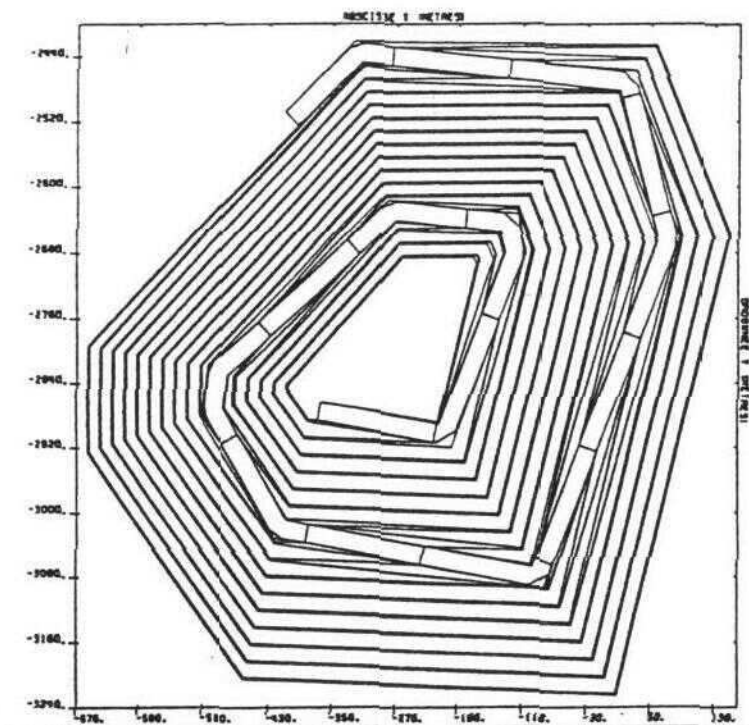


figure 6 : plan de la géométrie de la fosse Sainte-Marie de Carmaux avec piste.

Une fois ces secteurs calculés, la détection des risques de rupture et l'analyse de la stabilité sont menées de la même manière que dans le cas de fosse sans piste (figure 7). Seule la taille des objets étudiés est limitée à un gradin ou un ensemble de gradins; en effet, la notion de flanc de fosse n'est plus fondée puisqu'un flanc est constitué d'au moins deux secteurs tels qu'on les a définis, et d'un ou plusieurs tronçons de piste.

3. Apport de la présence d'une piste dans un modèle de fosse

D'un point de vue géométrique, l'insertion d'une piste dans un modèle de fosse représente une amélioration indéniable pour l'exploitant, qui peut ainsi rapidement visualiser les modifications géométriques qu'elle induit. Par une succession de simulations, il peut arriver facilement au résultat qui lui semble le meilleur.

En ce qui concerne l'analyse de la stabilité, on peut faire les remarques suivantes:

- la présence d'une piste conduit à subdiviser les flancs de la fosse en secteurs de hauteur réduite; par contre, les pentes moyennes de ces secteurs sont égales à celle du secteur initial sans piste.

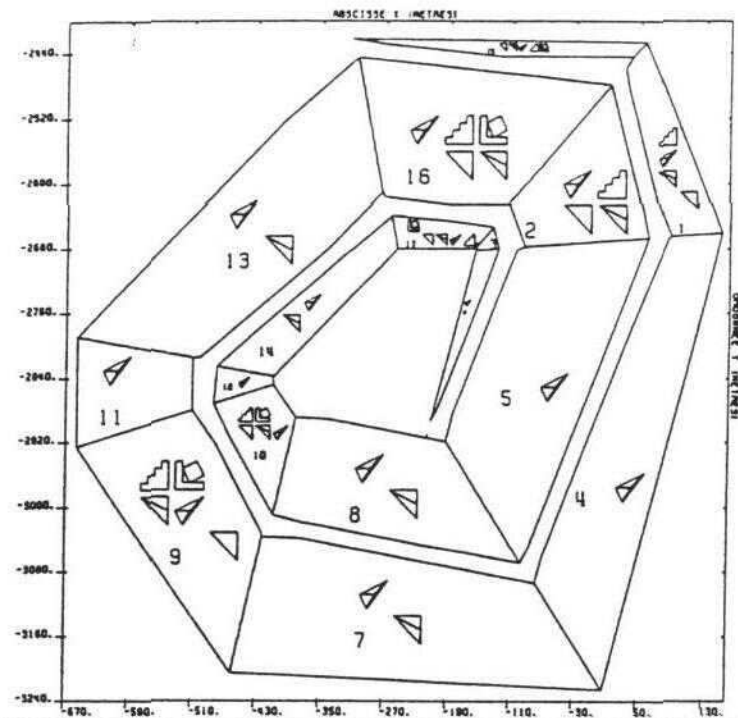


figure 7 : sectorisation de la fosse avec piste et résultats de la détection des risques de rupture concernant les gradins.

- de ce fait, les risques d'instabilité relatifs à la petite fracturation (non positionnée dans l'espace) sont identiques pour un secteur sans piste et pour les secteurs résultant de sa subdivision par la piste (figures 4 et 7). Par contre, les failles, positionnées dans l'espace, intersecteront de manière différente le secteur initial et les sous-secteurs obtenus par le passage de la piste (décalage d'une largeur de piste vers l'intérieur de la fosse). Les risques d'instabilité les mettant en jeu pourront différer.
- en ce qui concerne l'évaluation de la stabilité, même si les risques d'instabilité n'ont pas changé, les coefficients de sécurité seront les mêmes si les calculs sont faits sans cohésion, et plus élevés sinon (pente identique et hauteur plus faible).
- l'analyse de la stabilité ne peut se faire que sur des zones à caractéristiques géométriques constantes; par conséquent, la subdivision par la piste, d'un secteur en sous-secteurs réduit l'échelle d'analyse de la stabilité. Nous avons donc ajouté une commande qui permet, à partir du modèle géométrique avec piste, de reconstruire un modèle sans piste présentant sur chaque flanc des pentes moyennes calculées en tenant compte de la piste. Sur ce modèle, une analyse de stabilité à plus grande échelle pourra être à nouveau réalisée.

CONCLUSION

Le logiciel DEGRES est un outil qui favorise l'intégration des études géotechniques dans la planification minière.

En automatisant l'interprétation et l'analyse des données géologiques et géotechniques, il facilite à la fois le travail du géotechnicien et de l'exploitant. Il leur permet, par des simulations rapides, de tester différents scénarios géométriques aussi bien au stade du projet qu'en cours d'exploitation.

Bibliographie

1. TANAYS E. (1989): *Approche algorithmique des conceptions géométrique et géotechnique de mines à ciel ouvert*. Thèse de Doctorat de l'ENSMP. 217 p.
2. TANAYS E., COJEAN R., HANTZ D., SAVARY R. (1989): *Automatisation de la détection des risques de rupture et de l'évaluation de la stabilité des flancs d'une mine à ciel ouvert*. Industrie Minérale-Mines et Carrières-Les Techniques, Août-Septembre 1989, p. 35-45.
3. JACQUEMIN P., MALLET J.-L., ROYER J.-J. (1985): *Geol: an interactive computer aid design in the processing of mining and geological data*. In the role of data in scientific progress. P.S; Glaeser (ed). Elsevier Science Publisher B.V. (North Holland) p. 19-24.
4. HOEK E., BRAY J.W. (1981): *Rock Slope Engineering*. The Institution of Mining and Metallurgy. London.